9К

УДК 681.51:537.528

*С.С. Козирєв*
Національний університет кораблебудування МОН України, м. Миколаїв, Україна
skozyrev@gmail.com

# Синтез адаптивної системи керування електровибуховим перетворенням енергії на основі інверсної fuzzy-моделі

Побудовано інверсну модель електровибухового перетворення енергії на базі експериментальних даних з використанням методу fuzzy-апроксимації, основаного на теорії нечітких множин. На базі інверсної моделі синтезовано нечіткі регулятори для корекції параметрів адаптивної системи керування електровибуховим перетворенням енергії в умовах непередбачуваних зовнішніх впливів.

## Вступ

Результати теоретичного і експериментального дослідження електровибухового перетворення енергії в каналі високовольтного розряду в рідині як об'єкта керування показали, що об'єкт відноситься до дискретно-неперервних багатовимірних нестаціонарних стохастичних систем [1]. Оператор відповідності між координатами вхідного і вихідного векторів об'єкта та статистичні характеристики інформаційних координат залежать від положення в просторі станів, тому для реалізації основної переваги електровибухового перетворення енергії – керованості, необхідно синтезувати адаптивне керування, яке забезпечує оптимальні режими в умовах нестаціонарності параметрів середовища та невизначеності зовнішніх збурень.

**Мета роботи** – синтез нечітких регуляторів (НР) адаптивної системи керування на основі інверсної моделі електровибухового перетворення енергії, побудованої на базі експериментальних даних із застосуванням сучасних методів fuzzy-апроксимації, що базуються на теорії нечітких множин. Результатом чого стане розширення зони керованості, підвищення точності підтримки оптимальних технологічних режимів в реальних умовах.

## Побудова інверсної fuzzy-моделі для синтезу НР

Аналіз існуючих моделей та систем керування електровибуховим перетворенням енергії показав, що вони побудовані на основі лінеаризації об'єкта і забезпечують керування тільки в околі точки номінального режиму при певних припущеннях відносно збурень.

Забезпечення керованості електровибухового перетворення енергії у всьому просторі станів потребує введення механізмів адаптації для врахування нестаціонарності та стохастичності об'єкта. Механізм адаптації можна реалізувати, використовуючи системи керування на основі інверсних моделей, які генерують реакцію на збурення, визначаючи керуючий вплив, що гарантує необхідні значення вихідних координат. Достовірність інверсної моделі забезпечується точністю та повнотою опису властивостей

об'єкта та його статистичних характеристик. Побудова інверсної моделі передбачає отримання зворотної функції об'єкта керування, тобто функції, що дає змогу знаходити таке значення керуючого впливу, яке забезпечить задане значення вихідної інформаційної координати, а відповідно, і заданий режим електровибухового перетворення енергії та необхідний технологічний вплив, при поточному стані контрольованих параметрів об'єкта.

Аналітично пряму та інверсну модель електровибухового перетворення енергії, які адекватно описують об'єкт у всьому просторі станів, побудувати складно, так як фізичні процеси, що відбуваються в каналі розряду, неоднозначні, недостатньо вивчені, погано піддаються формалізації [2], тому для отримання цих залежностей доцільно застосувати сучасні методи fuzzy-апроксимації на основі нечіткої логіки, використовуючи бази експериментальних даних. З метою отримання бази даних проведено теоретичне і експериментальне дослідження процесу дискретного, з періодом *T*, електровибухового перетворення енергії в розрядному контурі генератора імпульсних струмів як об'єкта керування **Y***(nT)* = **AX***(nT)* (рис. 1).

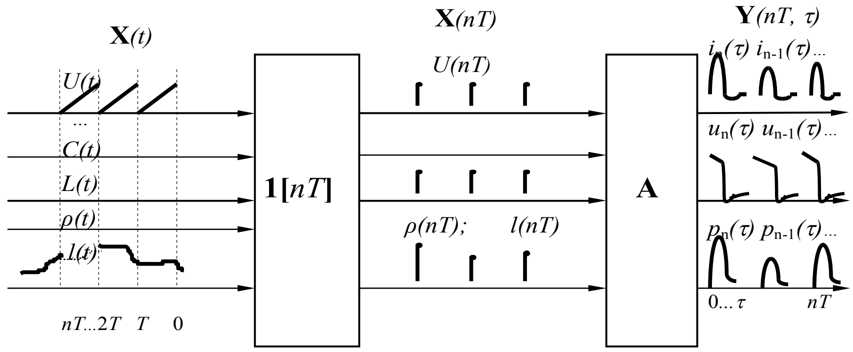



Рисунок 1 – Структурна схема електровибухового перетворення енергії як об'єкта керування

Координатами вхідного вектора **X***(nT)* можна вважати параметри розрядного контуру: *U* – зарядна напруга накопичувача; *C* – ємність батареї конденсаторів; *L* – індуктивність розрядного контуру, *l(nT)* – величина розрядного проміжку та $\rho[n]$ – питомий опір рідини, *n* – поточна реалізація процесу. Вихідний вектор **Y***(nT,τ)* – результат електровибухового перетворення енергії в каналі розряду, характеризується випадковими імпульсними функціями: $i(\tau)$ – розрядного струму, $u(\tau)$ – напруги на розрядному проміжку, $p(\tau)$ – тиску в каналі розряду, τ – тривалість розряду ($\tau << T$). Як координати вихідного вектора **Y***(nT)* можуть бути прийняті функціонали цих функцій, які кількісно і однозначно їх характеризують, наприклад, максимальні значення розрядного струму $i_m[n]$ і тиску $p_m[n]$ та пробивна напруга $u_{пр}[n]$. Експериментальне дослідження координат вихідного вектора [2] показало, що вони є дискретними випадковими функціями з нормальним законом розподілу в кожній точці факторного простору (відповідно, критерію згоди $\chi^2$, це не суперечить істині, з рівнем значимості $\alpha = 0{,}01$) і можуть бути представлені у вигляді: $y_m[n] = M_y[n]+y^0$, де $M_y[n]$ – математичне сподівання вихідної координати, $y^0$ – завада – стаціонарна випадкова величина з законом розподілу Гауса, статистичні характеристики якої визначаються процесами формування каналу розряду і залежать від положення об'єкта в просторі станів. Оператор об'єкта **A** множини вхідних станів **X** ставить у відповідність множину **Y** функціонального простору можливих реалізацій вихідних функцій. Як статистична ефективна інформа-

ційна координата прийнята лінійна комбінація корельованих з від’ємним коефіцієнтом кореляції вихідних координат: $\Sigma[n] = i_{\text{m}}[n] + ku_{\text{пр}}[n]/i_{\text{m}}[n]$, що має мінімальну дисперсію.

Інверсну модель будуємо у вигляді $l[n] = F\ (\Sigma[n], \rho[n])$, для чого необхідна база навчальних даних, тобто множини груп сигналів $(\Sigma[n], \rho[n])$, що будуть поступати на вхід системи керування, та відповідно очікувані (еталонні) значення керуючого сигналу $l[n]$. Такі групи сигналів формуємо, використовуючи базу експериментальних даних, наведену в [3].

Першим кроком при побудові нечіткої інверсної моделі є розподіл простору вхідних і вихідних сигналів на діапазони, які будуть слугувати термами при побудові функцій приналежності. Використано прямий метод побудови функцій приналежності, який не вимагає абсолютно точного визначення функцій приналежності, а лише тип функції та характерні значення, в даному випадку – значення в експериментальних точках за планом експерименту, які є опорними для діапазонів, прийнятих в якості терми. Приймаємо трикутну форму функцій приналежності. Одна з вершин ФП знаходиться в центрі кожного числового діапазону значень координати і їй відповідає значення функції $\mu^{\text{T}}(x)$, що дорівнює 1, дві інші вершини лежать в центрах сусідніх діапазонів, їм відповідає значення функції, що дорівнює 0. Як лінгвістичні вхідні змінні приймаємо координати $\rho[n]$, $\sum[n]$. Кількість термів (лінгвістичних значень, а у нашому випадку термів – числових діапазонів) для кожної змінної вибираємо рівною кількості рівнів значень за планом факторного експерименту. В даному випадку кількість термів дорівнює 5 та 4. Функції приналежності (ФП – $mf_i$ – $\mu^{\text{T}}(x)$) координат вектора стану $\rho[n]$, $\sum[n]$ апроксимуємо трикутною функцією (рис. 2). Для вихідної координати, тобто керуючого сигналу $l[n]$, виконуємо такі ж процедури: розподіл простору значень сигналу на діапазони, які слугують термами при побудові функцій приналежності; побудова трикутних функцій приналежності, координати вершин яких є еталонними очікуваними значеннями вихідної координати $l[n]$ (рис. 2).

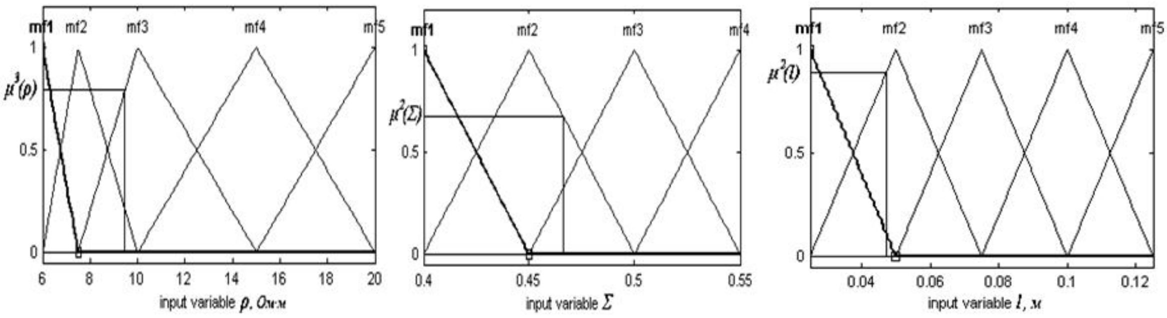



Рисунок 2 – Функції приналежності $\rho[n]$, $\sum[n]$, $l[n]$

Процедура fuzzy-фікації вхідних сигналів, тобто визначення приналежності поточного значення координат вхідного вектора до того чи іншого діапазону, проводиться за максимальним значенням функції приналежності $\mu^{\text{T}}(x)$.

База правил нечіткої інверсної моделі формується на основі бази навчальних даних, в якості якої використано експериментальні дані, за алгоритмом побудови бази нечітких правил на основі чисельних даних [4]. До бази правил включається правило, яке має найвищий ступінь істинності. Таким чином розв’язується проблема суперечливих правил, а також значно зменшується їх загальна кількість. Блок-схема алгоритму побудови бази правил на основі чисельних даних наведена на рис. 3.

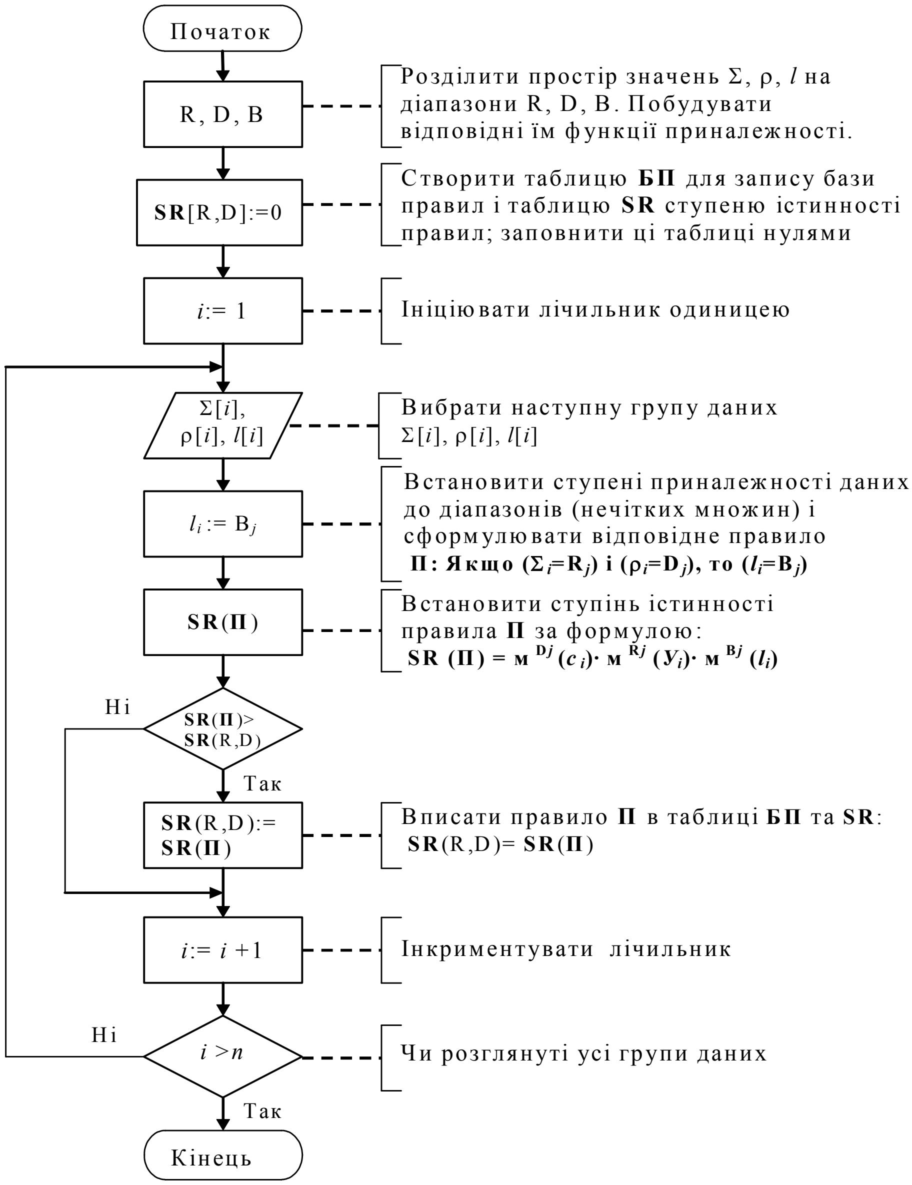



Рисунок 3 – Блок-схема алгоритму побудови інверсної моделі

Після застосування наведеного алгоритму до бази даних, отриманих при експериментальному дослідженні електровибухового перетворення енергії [3], отримано несуперечливу базу знань (табл. 1), яка є табличною формою запису бази правил нечіткого регулятора НР1 на основі нечіткої інверсної моделі. Значення інформаційної координати $\Sigma[n]$ дано у відносних одиницях, за базове значення прийнято амплітудне значення розрядного струму при короткому замиканні $I_{кз}$.

Таблиця 1 – Таблична форма бази правил НР1

| $M_{\Sigma}$ | $\rho$, Ом м | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 6,0 | 7,5 | 10,0 | 15,0 | 20,0 |
| 0,40 | 0,047 | 0,050 | 0,056 | 0,094 | 0,100 |
| 0,45 | 0,040 | 0,042 | 0,048 | 0,081 | 0,090 |
| 0,50 | 0,032 | 0,035 | 0,038 | 0,069 | 0,082 |
| 0,55 | 0,025 | 0,027 | 0,030 | 0,052 | 0,065 |

База правил у вигляді нечітких логічних рівнянь дозволяє пов'язати вихідний сигнал $l[n]$ та ФП координат вектора стану $\rho[n]$, $\sum[n]$, в результаті чого отримуємо значення керуючого впливу для певних діапазонів числових значень координат вектора стану.

Базу правил нечіткого регулятора НР2, що відтворює залежність середньоквадратичного відхилення інформаційної координати від положення в просторі станів $\sigma_\Sigma = F(l[n], \rho[n])$, синтезовано на основі експериментальної бази даних (табл. 2). Значення середньоквадратичного відхилення $\sigma_\Sigma$ приведене до математичного сподівання $\sum[n]$.

Таблиця 2 – Таблична форма бази правил НР2

| $l$, м | $\rho$, Ом м | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 6,0 | 7,5 | 10,0 | 15,0 | 20,0 |
| 0,025 | 0,028 | 0,024 | 0,023 | 0,015 | 0,010 |
| 0,050 | 0,037 | 0,036 | 0,036 | 0,014 | 0,012 |
| 0,075 | 0,042 | 0,040 | 0,039 | 0,015 | 0,013 |
| 0, 100 | 0,074 | 0,069 | 0,044 | 0,017 | 0,016 |
| 0,125 | 0,085 | 0,072 | 0,055 | 0,032 | 0,024 |

Моделювання нечітких регуляторів НР1, НР2 на основі отриманої бази правил проводимо в середовищі MATLAB, використовуючи пакет Fuzzy Logic Toolbox [5], який має простий інтерфейс для проектування і діагностики нечітких моделей. Графічні засоби Fuzzy Logic Toolbox дають змогу інтерактивно відслідковувати поведінку системи. Результати моделювання: НР1 – $l[n] = F(\Sigma[n], \rho[n])$ та НР2 – $\sigma_\Sigma = F(l[n], \rho[n])$ за допомогою fuzzy-апроксиматора представлені на рис. 4, 5.

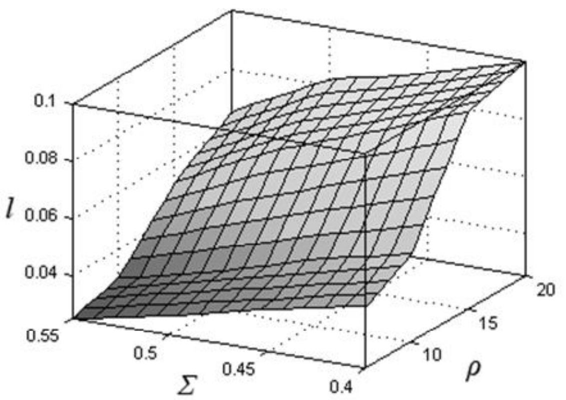



Рисунок 4 – Модель НР1: $l[n]=F(\Sigma[n], \rho[n])$

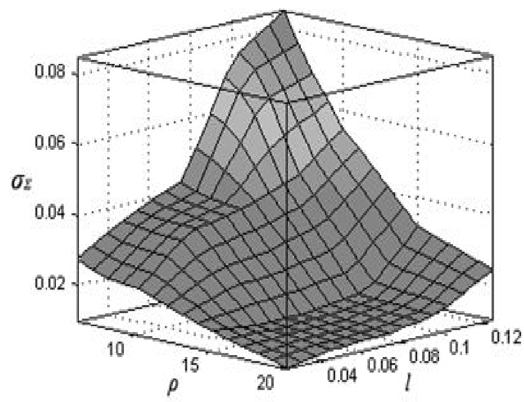



Рисунок 5 – Модель НР2: $\sigma_\Sigma = F(l[n], \rho[n])$

Структура адаптивної системи керування з застосуванням НР1, НР2 для корекції її параметрів в залежності від положення в просторі станів показана на рис. 6. Важливою властивістю системи керування з використанням НР на базі інверсної моделі є те, що вона забезпечує необхідні режими при будь-якому положенні об'єкта в просторі станів. Синтезована система керування реалізована на базі мікроконтролера архітектури AVR. Ресурси мікроконтролера дозволяють організувати досить складну ієрархічну багатомірну систему керування електровибуховим перетворенням енергії, що здатна вирішувати завдання керування в реальному масштабі часу із застосуванням різних алгоритмів керування у вигляді підпрограм.

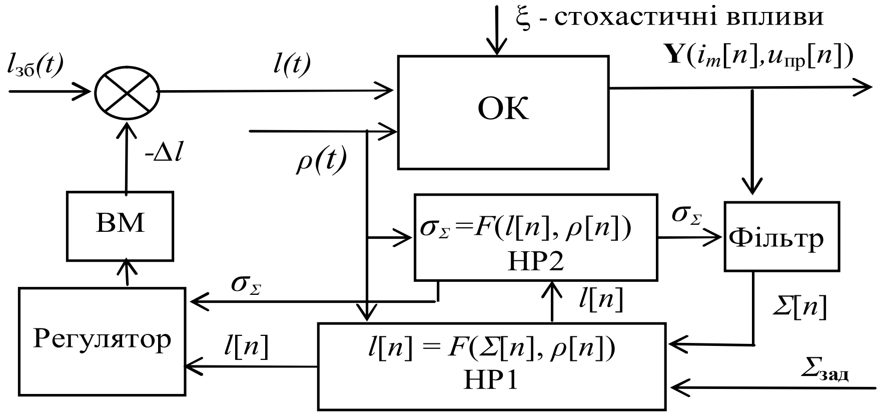



Рисунок 6 – Блок-схема адаптивної системи керування з НР1, 2

# Висновки

Використання інверсної моделі, побудованої на принципах нечіткої логіки, при синтезі нечітких регуляторів для корекції параметрів адаптивної системи керування електровибуховим перетворенням енергії в залежності від положення в просторі станів забезпечить адаптивність системи керування при зміні технологічних параметрів та параметрів середовища в широкому діапазоні. Така система керування зможе генерувати адекватну реакцію на збурення за рахунок визначення відповідного значення керуючого впливу за допомогою інверсної моделі.

Синтезована система керування забезпечує ефективне керування електровибуховим перетворенням енергії в усьому просторі станів при невизначеності зовнішніх збурень та нестаціонарності параметрів середовища.

# Література


1. Управление электрогидроимпульсными процессами / И.Т. Вовк, В.Б. Друмирецкий, Е.В. Кривицкий, Л.Е. Овчинникова. – Киев : Наук. думка, 1984. – 186 с.
2. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. – Киев : Наукова думка, 1986 – 206 с.
3. Козирєв С.С. Удосконалена модель керування електровибухового перетворення енергії / С.С. Козирєв // Зб. наук. праць НУК № 4 (415). – Миколаїв, 2007. – С. 101-109.
4. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М. : Горячая линия – Телеком, 2004. – 452 с.
5. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH / А.В. Леоненков. – СПб. : БХВ – Петербург, 2003. – 736 с.


***С.С. Козырев***

**Синтез адаптивной системы управления электровзрывоопасным превращением энергии на основе инверсной fuzzy-модели**

Построена инверсная модель электровзрывного превращения энергии на базе экспериментальных данных с использованием метода fuzzy-аппроксимации, основанного на теории нечетких множеств. На базе инверсной модели синтезированы нечеткие регуляторы для коррекции параметров адаптивной системы управления электровзрывоопасным превращением энергии в условиях непредсказуемых внешних влияний.

***S.S. Kozyriev***

**Synthesis of Adaptive Control System for Discharge Energy Conversion, Based on Inverse Fuzzy Model**

The fuzzy inverse model of control of discharge energy conversion was developed. The model is based on experimental data with fuzzy approximation. The fuzzy inverse model provides adaptability of control system under variable technological parameters and external conditions.

*Стаття надійшла до редакції 14.05.2009.*